

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：54601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13750

研究課題名（和文）風力発電タワー雷サージ特性を全時間領域で表現可能な理論的回路解析モデルの開発

研究課題名（英文）Development of a theoretical circuit analysis model for express the lightning surge characteristics of a wind turbine tower in the entire time domain.

研究代表者

池田 陽紀（Ikeda, Yoki）

奈良工業高等専門学校・電気工学科・講師

研究者番号：20759849

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：大規模風力発電所を対象とした雷サージ解析において、風車タワー部分を正確に表現するための垂直導体回路モデルの導出を目的とし、数値電磁界解析と縮小実験により、垂直導体のサージ特性について検討した。その結果、垂直導体上端から下方に向かうサージの第一波はほぼ光速で伝搬し、同寸法の水平導体上を伝搬するサージと差はないことや、下端において反射して上端へと戻るサージは大地に近いほど速度が遅く、上端に近づくにつれて加速することを明らかにした。また、導体断面寸法が導体長に対して無視できないほど太い場合には、サージは減衰しながら下端に向かうため、仮想的に伝搬速度が低下するように見えることも明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって明らかになった垂直導体の雷サージ伝搬特性は、雷サージ解析の対象となる垂直導体をその形状や寸法によって分類し、それぞれに適した理論回路モデルを提案するための指標となる。これは本研究が対象としている風力発電システムの雷サージ解析のみならず、雷被害の対象となりやすい送電鉄塔や高層ビルなどを対象とした雷サージ解析を高精度に実施することができ、効率的な雷対策につながる。また学術的には、多くの研究者があらゆる方向から垂直導体の回路モデル化を試みている中で、導体の寸法、形状、サージの伝搬方向に着目した新たな見解を示した。

研究成果の概要（英文）：A theoretical circuit model of vertical conductor is needed for high accuracy lightning surge simulation targeted at a large-scale wind farm. A surge propagation characteristic of a vertical conductor is revealed based on the result of a Finite Difference Time Domain (FDTD) method and a small-scale experiment in this study. The propagation velocity of the downward surge is about the same as the speed of light, which is the same as the propagation velocity on the horizontal conductor. On the other hand, the upward surge reflected at the lower end is slow at the lower part of the conductor and accelerates toward the upper end. If the conductor length is shorter than about 20 times the cross-sectional diameter, the surge attenuation cannot be negligible. The surge propagation speed appears to have decreased caused by the attenuation.

研究分野：雷保護

キーワード：垂直導体 雷サージ 数値電磁界解析 風力発電

1. 研究開始当初の背景

風力発電は今後さらに普及が望まれる再生可能エネルギーのひとつであり、わが国日本においても、すでに主要電源のひとつとして広く運用されている。また、電源に占める再生可能エネルギーの割合増加を狙い、近年では洋上への風力発電システムの建設も進められている状況である。しかし、これらの風力発電システムは落雷事故に起因する稼働率の低さが課題である。風力発電の雷被害対策の研究は、実機での実験が技術的、経済的に困難であるため、専ら計算機による「空間電磁界解析法」や「回路解析法」などの数値シミュレーションに基づいて進められる。

前者は、Maxwell の方程式に基づき解析対象空間の電磁界を計算するため対象物の形状や配置を考慮した高精度なシミュレーションが可能で、風車システムを構成する各パーツ(ブレードやタワー)レベルの研究に利用されるが、計算機メモリ容量による制限から、複数機のシステムからなるウィンドファーム全体を対象とした詳細な電磁界計算は不可能である。一方後者は、解析対象を等価回路に置き換えて表現し、接点方程式を解くことで、各部の電圧等を計算するため、計算機への負荷が極めて小さく、ウィンドファーム全体の解析などに広く用いられてきた。

従来、垂直導体の回路モデルが存在しないためにウィンドファームの雷サージ解析において風車タワーは省略され、風車間の電力線や通信線のみが考慮されたモデル回路により研究がなされてきた。しかし、ウィンドファームのうち一基の風車に落雷があった場合、雷サージは連携線でつながる他の風車の影響を受け、波形を変化させながらウィンドファーム全体へ波及する。したがって、より高精度な雷サージ解析を行うためには、垂直導体である各風車のサージ特性を表現する等価回路モデルを用いるべきである。従来研究では、垂直導体における雷サージ伝搬特性はタワー上端への落雷後、サージがタワー上を1往復するまでの時間とそれ以降とで変化することがわかっているが、そのような特性変化のメカニズムと回路モデルへの導入手法については未だ確立されていない。

2. 研究の目的

本研究では、サージが伝搬する垂直導体周囲の過渡電磁界を数値電磁界解析によって計算し、その特性について明らかにすることで垂直導体のサージ特性が時間的に変化する原理とその特性について明らかにする。また、アルミ製パイプを用いた縮小実験により、その現象を実測することも試みる。そのうえで、従来研究において提案されている回路モデルの組み合わせにより垂直導体におけるサージ特性を表現可否について評価し、最終的には回路モデルの構築を目指す。

3. 研究の方法

Finite Difference Time Domain (FDTD) 法による数値電磁界解析により、サージが伝搬する導体周囲の過渡電磁界を計算し、その特性を分析する。大容量計算機を用いることで、空間的、時間的に十分な分解能で評価検証を行う。また、従来明らかにされていた、落雷直後とそれ以降でのサージ特性の違い、およびその経時変化について検討する。

数値解析で得られたサージ特性が、実現象として生じ得ることを、アルミパイプを用いた縮小実験により確認する。ただし、光速に近い速度で伝搬する雷サージは、縮小モデルでの観測が極めて難しいため、測定系についても検討を要する。

4. 研究成果

(1) 導体と大地との位置関係

図 1-A に示すのは FDTD 法に基づく数値電磁界解析における解析モデルである。解析空間は一辺 5cm の立方体空間で分割して表現し、各小空間において電界および磁界を逐次計算する。本解析では棒状導体の一端から落雷を模擬した電流を注入し、電流注入点における電位を観測する。その際、大地を表現する完全導体平板を、解析空間の底部に配置した場合(垂直導体を表現)、側部に配置した場合(水平導体を表現)、導体を配置しない場合(大地の影響がない状態)の3ケースについて同様の計算を実施した。

図 1-B より、垂直導体、水平導体、大地なしのそれぞれのケースにおける電圧波形は時刻約 13ns まで一致し、電流注入時に生じた電磁波が完全導体平板において反射し、電圧観測点に到達するまで、3つのケースに違いがないことを確認した。これは導体の電流注入点から見た特性インピーダンスは、電磁波が大地において反射し電位観測点に到達するまでは大地の影響を受けず、導体の形状のみに依存することを意味する。

また、本解析の垂直導体を表現した場合のケースでは、電圧波形の変曲点間の時間は徐々に伸びる傾向を示しており、さらにその変化は時間の経過とともに小さくなることも分かった。

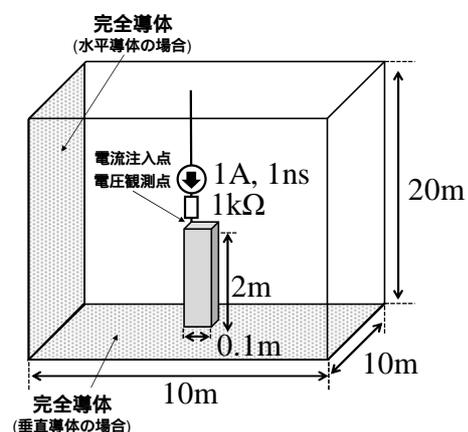


図 1-A FDTD 解析モデル

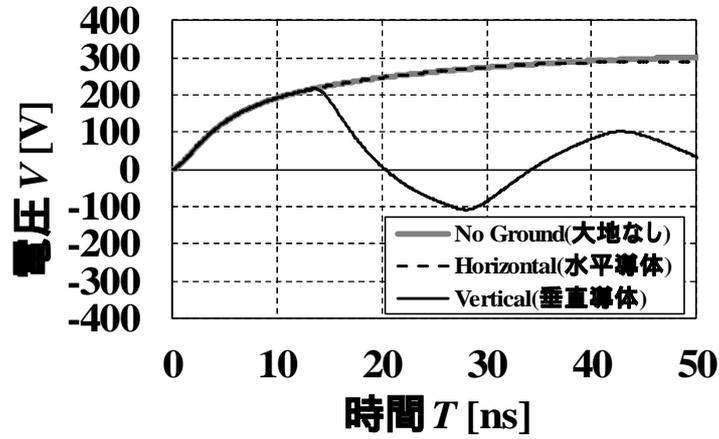


図 1-B 電流注入点における電位波形

(2)縮小実験による観測

図 2-A に示すのは実験配置である。直径約 150mm,長さ 2m のアルミ製パイプを用いて風車タワーのスケールモデルとし,パイプ上端から電流を注入した場合の上端電位を観測した。図 2-B に示すのは注入電流を観測したもので,数 ns で立ち上がるステップ波形を有する。図 2-C に示すのは,観測されたパイプ上端における電位波形である。この電位波形は時刻 13.5ns において脚部からの反射波到来による第一変曲点を生じ,28.0ns において第二変曲点を生じた。第一波の往復伝搬時間は 13.5ns,第二波目は 14.5ns であることから,1 往復目のサージ伝搬速度は $(4\text{m} / 13.5\text{ns}) = 0.296\text{m/ns}$,2 往復目は 0.276m/ns となり,1 往復で約 7%減速したことが確認できた。以降は,測定系への誘導電圧やサージの反射現象により正確な波形観測は困難であった。

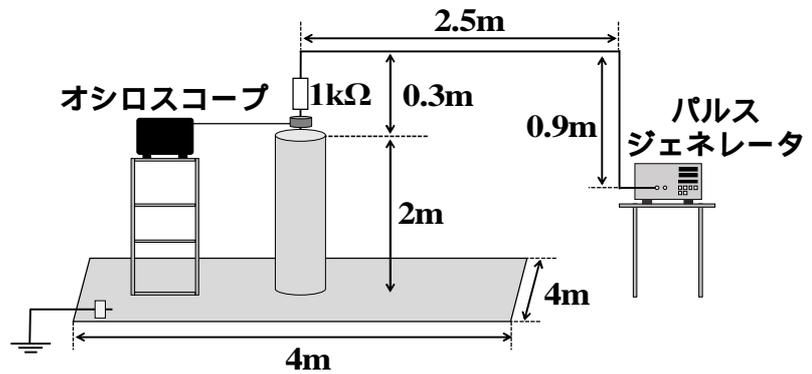


図 2-A 実験回路

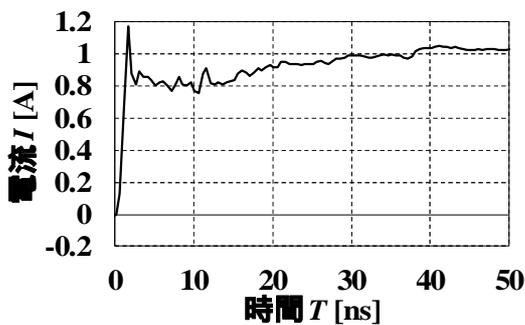


図 2-B 注入電流波形

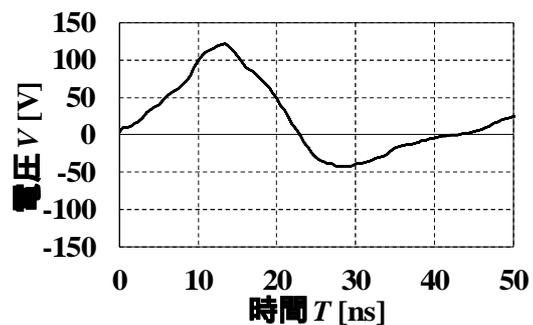


図 2-C 垂直導体上端電位波形

(3)高さによるサージ伝搬速度の変化

図 3 に示すのは,図 1-A のモデルにおいて,各高さにおける垂直導体表面の電界強度の時間変化である。各高さにおける垂直導体表面の電界強度が立ち上がりを開始する時刻をサージの到達時刻とみなし,各区間におけるサージの伝搬時間とその区間における伝搬速度を計算したものを表 1 にまとめた。表 1 より,導体下部の区間(高さ 0.5~0.05m)のサージ伝搬速度は導体上部の区間(高さ 2~1.5m)のサージ伝搬速度より 4%程度遅くなる傾向にある。図 3 の電界波形は電流注入点(高さ 2m の点)から下方に伝搬するにしたがって,立ち上がり峻度が低下していることがわかる。このことから,垂直導体上を下向きに伝搬するサージの伝搬速度の変化は伝搬過程における波形の減衰に起因すると考えられる。

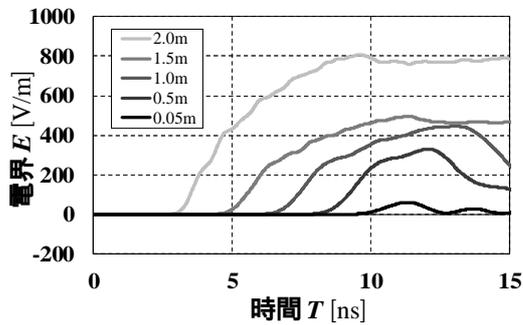


図3 各高さの導体近傍電界

| 導体上の位置 (地面からの高さ) [m] | 伝搬時間 T [ns] | 伝搬速度 v [m/ns] |
|----------------------------|------------------|--------------------|
| 2 ~ 1.5 | 1.704 | 0.2934 |
| 1.5 ~ 1 | 1.714 | 0.2917 |
| 1 ~ 0.5 | 1.714 | 0.2917 |
| 0.5 ~ 0.05 | 1.598 | 0.2815 |

(4) サージ伝搬方向による速度変化

図4-Aに示す解析モデルを用いて、各高さにおける電位を観測し、その波形から下向きサージと上向きサージの伝搬速度を算出する。なお、導体上におけるサージの広がりや分布を観測するため、導体長さを13m、導体断面は一辺が0.1m~0.5mの正方形としている。また、解析空間境界面の影響を小さくするため、空間分割に不等間隔目メッシュを適用し、解析空間境界面と導体との距離を広く確保している。また、解析空間の寸法は解析対象の導体寸法に合わせて調整し、解析対象と解析空間境界面との距離を各ケース間一致させている。また電位観測点間の距離を短くすることで、波形減衰による影響を最小限としている。

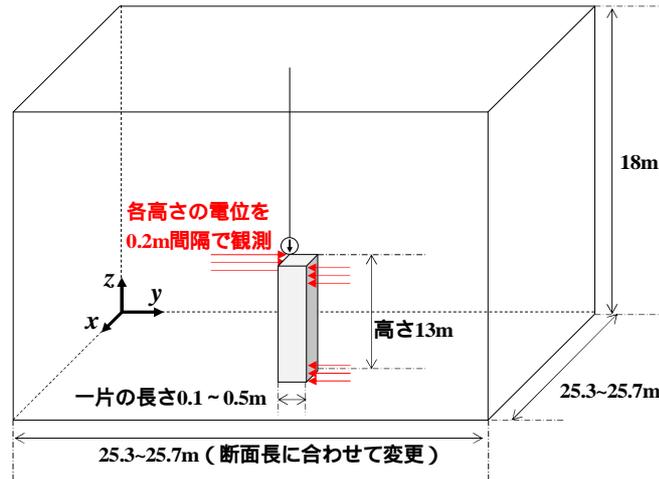


図4-A 高分解能解析モデル

図4-Bに示すのは、導体断面の一辺の長さが0.1mの場合における上端下端の上向きサージと下向きサージの伝搬速度をまとめたものである。図より、下向きサージは導体上部と下部で伝搬速度に変化はなく、下端において反射した上向きサージは伝搬速度が極端に遅く、上端に向かうにつれて加速することがわかる。また、この傾向は図4-Cに示す断面の一辺を0.2mとした場合の方がより顕著に表れる。

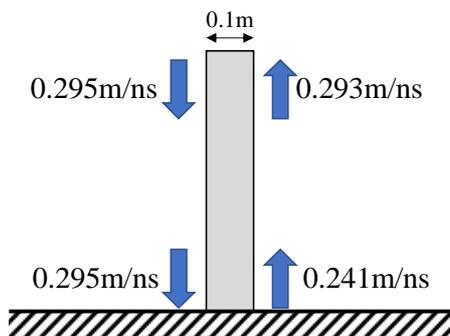


図4-B 伝搬速度 (一辺 0.1m)

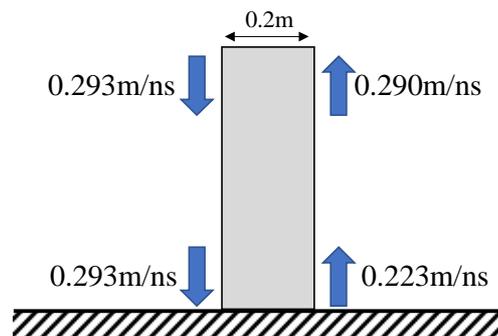


図4-C 伝搬速度 (一辺 0.2m)

(5) 導体の断面寸法と長さの影響

図4-Aに示すように正方形断面を有する垂直導体上端の角部に電流を注入した場合に、各高さにおける電流注入点直下とその対角側の電位を観測し、サージの到達時刻を計算する。つまり、同一高さにおいて、対角の電位波形が同時に立ち上がれば、サージは進行方向に対して導体表面を均一に伝搬していることを意味する。図5-Aに示すのは、導体断面の一辺が0.1mの場合の各高さにおける電位波形である。導体上端(伝搬距離0m)では、電位立ち上がり時刻に約0.4nsの差があるが、3m下方(伝搬距離3m)ではサージの到達時刻にほとんど差はない。一方で、図5-B、図5-Cに示す導体断面を一辺が0.2m、0.4mの場合には、サージの到達時刻の差がなくなるまでの距離も長くなっている。つまり、垂直導体上端の一点からサージが侵入した場合、サージは

導体周方向に伝搬しつつ下方に向かうことになる。そのため、十分な距離を伝搬するまでは、導体の長さ方向に垂直な断面において、サージは均一にならず、着雷点側に偏って分布することになる。その結果、図 5-D に示すように、導体断面寸法によって、サージは均一になるために必要な伝搬距離が異なる。

見方を変えれば、垂直導体上を第一波が下方に伝搬する時には各高さにおいて垂直導体のサージインピーダンスは下方に向かうほど徐々に小さくなる傾向を示すことになる。また、サージが進行方向に対して導体表面を均一に伝搬ようになる高さは、導体断面直径と相関性があることも明らかにした。一般的な 2MW 級風車のタワー（高さ 60m、直径 5m）の場合、タワー上端の一点から進入したサージは、タワー下端においても均一にはならず、導体周方向へのサージ伝搬を無視できない。その結果、サージは時間の経過とともにその減衰割合も変化させながら、導体上を伝搬することになる。

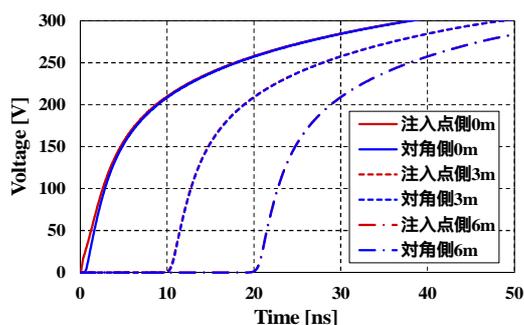


図 5-A 電位波形（一辺 0.1m）

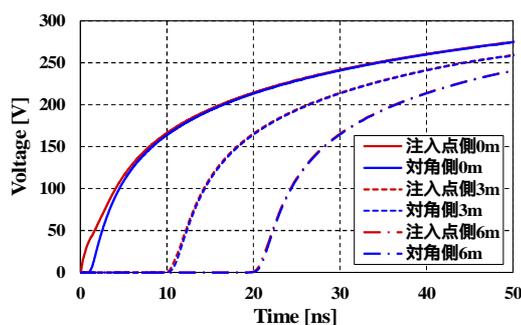


図 5-B 電位波形（一辺 0.2m）

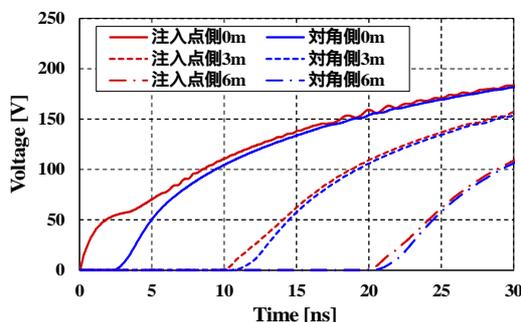


図 5-C 電位波形（一辺 0.5m）

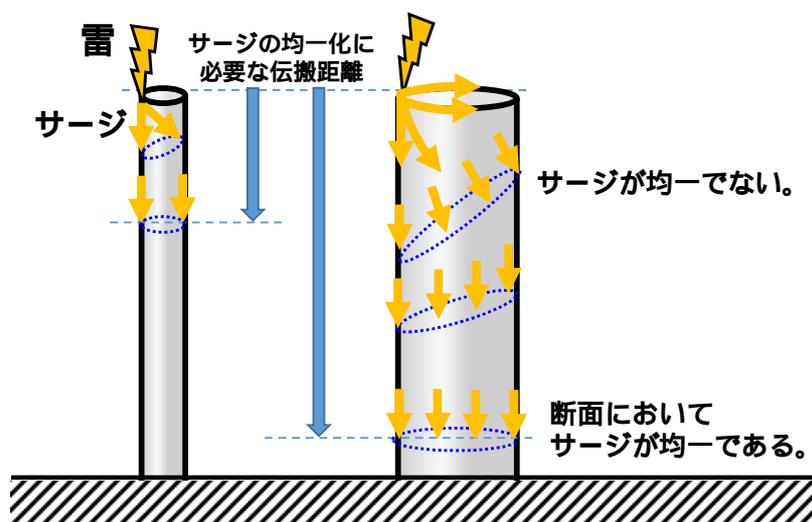


図 5-D サージ伝搬の概念図

(6)まとめ

研究開始当初、垂直導体におけるサージ伝搬特性は従来研究で提案された短時間用および長時間用の回路解析モデルを単純に組み合わせるだけで表現できると考えていたが、本研究により得た結果から、それが容易ではないことが分かった。上記(1)～(5)の結果から、導体におけるサージ特性は、導体寸法、大地との位置関係、伝搬距離、伝搬方向の影響を顕著に受けるため、単純な回路モデルの組み合わせや切り替えなどでは、垂直導体のサージ特性を表現することは難しく、垂直導体の回路的表現方法についてはさらに検討が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 出井秀征, 池田陽紀 |
| 2. 発表標題 大地からの高さによる垂直導体サージ伝搬速度の変化 |
| 3. 学会等名 誘電・絶縁材料, 放電・プラズマ・パルスパワー, 高電圧合同研究会資料 |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|